

Proyecto Fin de Carrera

Desarrollo de una herramienta de cálculo de
instalaciones de flujo compresible

Autor

Álvaro Muelas Expósito

Director

Javier Ballester Castañer

Codirector

Ennio Giovanni Luciano

Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Junio de 2015

Desarrollo de una herramienta de cálculo de instalaciones de flujo compresible

RESUMEN

El cálculo de líneas e instalaciones por las que circula un flujo compresible es un problema habitual en multitud de aplicaciones industriales y del mundo de la investigación. Su resolución es notablemente más compleja que la del caso incompresible, debido tanto a la constante variación de la temperatura y densidad del fluido como a la aparición de fenómenos como el bloqueo sónico o las ondas de choque. En este contexto, se ha decidido desarrollar un programa informático que sea capaz de resolver líneas e instalaciones de flujo compresible para su uso en el *Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión* (LIFTEC), donde se ha llevado a cabo el proyecto.

Tras realizar un estudio de la teoría del flujo compresible, se ha analizado el conjunto de programas informáticos comerciales disponibles en la actualidad, de forma que se conozca el estado del arte de este tipo de códigos. Una vez llevado a cabo este análisis, se ha obtenido un conocimiento suficiente como para poder definir los objetivos y el alcance del programa a desarrollar. Éste deberá ser capaz de calcular seis tipos de elementos (*Tramo Recto, Codo, Cambio de Sección, Válvula, Compresor y Orificios*), que podrán disponerse en tres configuraciones distintas (*Línea Simple, Malla y División de Flujo*). Asimismo, el programa deberá ser capaz de calcular casos de bloqueo sónico de una forma robusta, sin errores de ejecución.

Una vez llevado a cabo este trabajo previo y concretados los objetivos del programa, se han definido las ecuaciones y parámetros característicos de cada uno de los seis elementos considerados, así como los procedimientos de cálculo necesarios para resolver las tres configuraciones a implementar, teniendo en cuenta las problemáticas derivadas de la posible aparición de casos de bloqueo sónico y ondas de choque. Tras este proceso, se ha procedido a la escritura del código en *Matlab*, completando el desarrollo del programa con la creación de sus interfaces de entrada y salida, desarrolladas en *Microsoft Excel* con la asistencia de *Visual Basic for Applications*. Como último paso, y tras conseguir acceso a una licencia del programa comercial *AFT Arrow*, se ha realizado una validación del programa, resultando ésta satisfactoria.

Tras completar todas estas etapas, se dispone de un programa validado de cálculo de flujo compresible en conductos y accesorios capaz de resolver instalaciones relativamente simples, pero de uso común en la industria. Posee además un comportamiento robusto frente a la aparición de casos de bloqueo sónico y ondas de choque, permitiendo su cálculo en todos los casos en los que se puedan producir, a diferencia de gran parte de los códigos comerciales actuales.

Agradecimientos

Quisiera en primer lugar agradecer a Javier Ballester la confianza depositada en mí al darme la oportunidad de realizar este proyecto, así como todo su apoyo y guía durante el mismo.

También, cómo no, agradecer a Ennio Luciano por su ayuda continua y buenos consejos durante estos meses, en los que no sólo he aprendido sobre el flujo compresible o cómo desarrollar un programa, sino también qué playas visitar en Cerdeña o dónde comer un buen plato de pasta en Alghero.

Agradecer también a Francisco Alcrudo por brindarme la oportunidad de utilizar su licencia de *AFT Arrow* en la fase de validación del programa.

A todos mis compañeros del LITEC, que han hecho que el ambiente de trabajo haya sido en todo momento inmejorable, y especialmente al “equipo Iberdrola”, siempre peleando con turbinas y compresores.

A mis amigos, tanto los que están en Zaragoza como los que viven fuera, que han conseguido convertir estos meses post-Erasmus en un magnífico año.

Y finalmente a mi familia, especialmente a mis padres y hermana por su apoyo incondicional, ahora y siempre.

¡Gracias a todos!

Tabla de Contenidos

I. MEMORIA

1. Introducción.....	1
1.1 Breve introducción al flujo compresible	1
1.2 Programas comerciales de cálculo de flujo compresible	2
1.3 Objetivo y alcance del proyecto	3
1.4 Contenidos del Proyecto: Memoria y Anexos	4
2. Modelado de elementos.....	7
2.1 Tramo Recto	7
2.2 Codo	8
2.3 Cambio de sección.....	8
2.4 Válvula	9
2.5 Compresor	9
2.6 Orificios.....	10
3. Método de cálculo de líneas y redes de conductos.....	11
3.1 Método de cálculo de <i>Línea Simple</i>	12
3.1.1 <i>Línea Simple A</i>	12
3.1.2 <i>Línea Simple B</i>	12
3.2 Método de cálculo de <i>Malla</i>	14
3.2.1 Detección del caso de aplicación: <i>Bifurcación o Recirculación</i>	14
3.2.2 Resolución del caso <i>Bifurcación</i>	15
3.2.3 Resolución del caso <i>Recirculación</i>	17
3.3 Método de cálculo de <i>División de Flujo</i>	21
4. Descripción del programa	23
4.1 Interfaz de entrada.....	23
4.1.1 Propiedades del gas	24
4.1.2 Modos y configuraciones de resolución.....	24
4.1.3 Composición elemental de cada línea simple	25
4.2 Interfaz de salida	25

5. Validación de resultados.....	27
5.1 Validación de elementos.....	27
5.2 Validación de configuraciones	31
5.2.1 <i>Línea Simple</i>	31
5.2.2 <i>Malla</i>	33
5.2.3 <i>División de Flujo</i>	34
6. Conclusiones	37
Índice de Figuras	39
Índice de Tablas.....	40
Bibliografía	41

II. ANEXOS

A: Análisis de programas comerciales de cálculo de flujo compresible en conductos.....	45
B: Método de cálculo de los distintos elementos.....	61
C: Método de cálculo de <i>Línea Simple</i>	87
D: Método de cálculo de la configuración <i>Malla</i>	97
E: Método de cálculo de la configuración <i>División de Flujo</i>.....	117
F: Interfaz de entrada: guía de utilización.....	121
G: Validación de los distintos elementos	137
H: Validación de configuraciones	155
I: Validación de la configuración <i>Malla (Bifurcación)</i>.....	163

Nomenclatura

Ma	Número de Mach
\dot{m}	Gasto másico
γ	Coeficiente de dilatación adiabática
P	Presión
T	Temperatura
ρ	Densidad
K	Constante de pérdidas
v	Velocidad
Z	Factor de compresibilidad
M	Peso molecular del gas considerado
R	Constante del gas considerado
η	Rendimiento

Subíndices:

b	Bloqueo
1	Entrada
2	Salida
s	Isoentrópico
$L1$	Línea 1
$L2$	Línea 2
$L3$	Línea 3
$L4$	Línea 4
$comp$	Línea del compresor
$recirc$	Línea de recirculación
$N1$	Nodo 1
$N2$	Nodo 2

Superíndices:

0	Propiedad de remanso
-----	----------------------

Parte I

Memoria

1. Introducción

1.1 Breve introducción al flujo compresible

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta de cálculo de flujo compresible en conductos, que presenta algunas diferencias importantes respecto al caso, mucho más común, de flujo incompresible. Antes de describir en más detalle el contenido del trabajo, se introducen aquí algunas nociones básicas sobre el flujo compresible en conductos. Si se desea profundizar en este tema, se recomienda la lectura del capítulo 9 de la referencia [1].

El flujo compresible en conductos es aquel en el cual la densidad del fluido varía a lo largo de su recorrido. Aunque estrictamente hablando todos los fluidos son compresibles, la mucho mayor compresibilidad de los gases en comparación con los líquidos hace que, para las diferencias de presión habituales en la mayoría de las aplicaciones industriales, los líquidos puedan considerarse a efectos prácticos como incompresibles, mientras que los gases deban ser tratados como fluidos compresibles, especialmente cuando el flujo posee elevadas velocidades.

La velocidad del flujo, o más concretamente el número de Mach (Ma) se convierte en un parámetro clave para evaluar si un gas debe ser considerado como compresible o si, por el contrario, puede ser tratado sin cometer grandes errores como incompresible, facilitando sustancialmente su tratamiento. En la bibliografía es común la condición de $Ma \leq 0.3$ para poder tratar un flujo de un gas como incompresible [1]. Para Ma mayores de 0.3 los efectos de compresibilidad comienzan a ganar peso, debiéndose tratar el flujo como compresible.

En un flujo compresible se producen cambios de densidad significativos, asociados a cambios sustanciales en la presión y/o temperatura a través de la ecuación de estado del gas. El hecho de que la temperatura y la energía interna sufran variaciones no despreciables hace que sea necesaria la evaluación de 4 ecuaciones básicas, frente a las 2 habituales para el flujo incompresible [1]:

Ecuaciones flujo incompresible:

- Continuidad
- Conservación de la cantidad de movimiento

Ecuaciones flujo compresible:

- Continuidad
- Conservación de la cantidad de movimiento
- Ecuación de estado
- Conservación de energía

Así pues para el flujo compresible se tiene que, además de la presión, la temperatura y la densidad varían a lo largo del conducto, conllevando su cálculo la resolución de cuatro ecuaciones acopladas, frente a las dos necesarias para el flujo incompresible.

Una problemática adicional en el tratamiento del flujo compresible es la aparición de los fenómenos de bloqueo sónico y ondas de choque. El bloqueo sónico se produce cuando en algún punto el flujo alcanza la velocidad del sonido ($Ma=1$). En ese punto se tiene que el gasto

másico circulante deja de depender de las condiciones aguas abajo del elemento bloqueado, por lo que, por mucho que se disminuya la presión a la salida de dicho elemento, el flujo aguas arriba no se verá alterado y el gasto másico no aumentará. Si la presión aguas abajo del punto de bloqueo es inferior a su presión crítica, el flujo se adaptará mediante la aparición de ondas de choque, consistentes en una brusca discontinuidad en las propiedades del flujo, que sufre una pérdida irreversible de presión para acomodarse a la presión que tiene aguas abajo [1]. De esta forma, en una onda de choque el flujo pasa abruptamente de ser supersónico ($Ma > 1$) a subsónico ($Ma < 1$).

1.2 Programas comerciales de cálculo de flujo compresible

Como paso previo al desarrollo del programa de cálculo de flujo compresible, se ha realizado una evaluación de los códigos comerciales disponibles en el mercado para la resolución de flujo compresible en conductos, con el objeto de conocer sus características, sus limitaciones y, en caso de poder obtener acceso a la información, sus métodos de cálculo. En el Anexo A se presenta este estudio más en detalle. Se muestra a continuación una tabla resumen en la cual se comparan los principales aspectos de los programas evaluados:

Tabla 1.1. Comparación de programas comerciales de cálculo de flujo compresible en conductos

	FreeCalc	PipeFlo	DesignNet	PDrop	Helix Delta Q	KYPipe	Flowmaster V7	GASWorks	AFT Arrow	FluidFlow	CFCFD Project
Gratuito	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Grandes sistemas de tuberías	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Gas real	✗	✗	✗	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Permite escoger tubería isoterma o adiabática	✗	✗	✓	✓	✓	✗	?	✗	✓	✓	✓
Permite modelar transmisión de calor	✗	✗	✓	✗	?	?	✓	✓	✓	✓	✓
Maneja la restricción al gasto másico debida al bloqueo sónico	✗	✗	?	?	✓	?	?	✗	✓	?	N/A
Permite analizar transitorios	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓
Permite 2-3 D	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Interfaz gráfica interactiva	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

De entre los programas investigados, se ha llegado a la conclusión de que la mayoría de ellos presentan un perfil bastante común y de aplicación directa a las necesidades de la industria: de pago, resuelven grandes redes de tuberías de transporte de gas suponiendo flujo 1D estacionario, con posibilidad de gas ideal o real, flujo isoterma o adiabático, y a veces incluso con posibilidad de modelar transferencia de calor. En este perfil se encuentran programas como *PipeFlo*, *DesignNet*, *PDrop*, *Helix Delta Q*, *KYPipe* o *AFT Arrow*. Este último será el utilizado para realizar la validación del programa desarrollado.

Los únicos dos programas gratuitos de entre los evaluados son *FreeCalc* y *CFCFD Project*. El primero es un programa online muy simplificado y rígido, en el cual únicamente es posible calcular la caída de presión producida en una única línea consistente en una serie de elementos predefinidos. Los programas desarrollados por *CFCFD Project*, por otra parte, son códigos de libre acceso, muy técnicos y complejos, aplicables únicamente a casos muy específicos (flujos supersónicos, análisis 2 y 3 D, etc.) que quedan fuera del alcance de los programas comerciales. No son capaces sin embargo de analizar instalaciones completas, reduciéndose su alcance a regiones muy concretas (boquillas, álabes, etc.).

Un aspecto importante es el tratamiento y las posibilidades que ofrece cada código para el análisis del funcionamiento con bloqueo sónico. Aparece muy poca información al respecto en las páginas web de los desarrolladores, quizá porque sus capacidades son limitadas en este sentido. Uno de los pocos programas que indica en su página web que es capaz de tratar el fenómeno del bloqueo es *AFT Arrow*, como se verá más adelante en el capítulo de validación.

1.3 Objetivo y alcance del proyecto

El objetivo del presente Proyecto Final de Carrera es el desarrollo y posterior validación de una herramienta de cálculo de flujo unidimensional y estacionario de gas en conductos y accesorios, en condiciones de altas velocidades y efectos de compresibilidad no despreciables. Dicha herramienta de cálculo será implementada en un código informático, incorporando las correspondientes interfaces de entrada y salida de datos, de forma que a la finalización del Proyecto se disponga de una herramienta funcional para la resolución de instalaciones sencillas por las que circule un flujo compresible. Tras la evaluación de distintas alternativas, se ha decidido la utilización del entorno de desarrollo integrado (IDE) *Matlab* para la programación de la herramienta de cálculo, mientras que las interfaces de entrada y salida se basarán en el uso conjunto de *Microsoft Excel* y *Microsoft VBA (Visual Basic for Applications)*.

El planteamiento inicial es que el programa desarrollado posea dos modos de cálculo distintos:

- a) Cálculo de las condiciones de salida (presión y temperatura) de la instalación, tras fijar el usuario las condiciones de entrada y el gasto másico circulante.
- b) Cálculo del gasto másico circulante entre dos presiones fijadas por el usuario.

El primer modo de cálculo (llamado a partir de aquí “*Modo A*”) debería ser capaz de resolver tres tipos de configuraciones diferentes:

- 1. Línea Simple: cualquier sucesión de conductos y accesorios siempre y cuando se mantenga la secuencialidad: la salida de un elemento debe ser la entrada del elemento siguiente.
- 2. Malla: dos ramales en paralelo unidos mediante dos nodos.
- 3. División de flujo: separación de una línea simple en dos mediante un único nodo.

El segundo tipo de cálculo (llamado a partir de aquí “*Modo B*”), debido a su mayor complejidad, solamente poseerá la configuración “*Línea Simple*”.

Respecto a los tipos de accesorios que el programa debería ser capaz de resolver, se ha propuesto la implementación de seis tipos de elementos:

1. Tramo Recto.
2. Codo.
3. Cambio de sección, tanto convergente como divergente.
4. Válvula.
5. Compresor.
6. Orificios.

El programa deberá asimismo tener en cuenta la posibilidad de que se produzcan bloqueos sónicos en la instalación, manejando este tipo de situaciones de una forma robusta y sin que se produzcan errores de ejecución. Una vez finalizada la elaboración del programa se validarán sus resultados con un software de cálculo de flujo compresible comercial (*AFT Arrow*), de forma que se pueda evaluar su correcto funcionamiento de cara a su posterior utilización.

El presente Proyecto Final de Carrera se enmarca dentro de las actividades docentes del Área de Mecánica de Fluidos y está relacionado con una de las líneas de trabajo del grupo de investigación del LIFTEC (*Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión*).

1.4 Contenidos del Proyecto: Memoria y Anexos

Debido a la extensión del trabajo realizado, se ha decidido plantear la Memoria como un resumen ejecutivo en el cual se muestren los aspectos más relevantes de cada uno de los puntos a tratar, ampliándose posteriormente algunos de estos temas en los Anexos. Se pretende así facilitar una rápida comprensión del trabajo realizado, evitando entrar en excesivos detalles en la Memoria en favor de que ésta presente una estructura más clara en su conjunto. La Memoria del Proyecto contiene los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1:** Breve introducción al flujo compresible y a los programas comerciales disponibles actualmente. Objetivos y alcance del Proyecto, junto con una breve descripción de su contenido.
- **Capítulo 2:** Modelado de elementos. Se explican brevemente las ecuaciones con las cuales se modela cada elemento.
- **Capítulo 3:** Método de cálculo de líneas y redes de conductos. Se resume aquí el método de cálculo de las tres configuraciones posibles: *Línea Simple*, *Malla* y *División de Flujo*.
- **Capítulo 4:** Descripción del programa desarrollado: interfaz de entrada, herramienta de cálculo (*Solver*) e interfaz de salida.
- **Capítulo 5:** Validación de resultados, tanto a nivel de elementos como a nivel de configuraciones.
- **Capítulo 6:** Resumen y conclusiones. Valoración crítica del Proyecto, así como posibilidades de ampliación o mejora del programa desarrollado.

Los siguientes Anexos describen más en detalle algunos de los puntos tratados en la Memoria:

- **Anexo A:** Análisis y comparación de diversos programas comerciales de cálculo de flujo compresible en conductos.
- **Anexo B:** Método de cálculo de los distintos elementos.
- **Anexo C:** Método de cálculo de la configuración *Línea Simple*, tanto para el modo de cálculo A como para el B.
- **Anexo D:** Método de cálculo de la configuración *Malla*.
- **Anexo E:** Método de cálculo de la configuración *División de Flujo*.
- **Anexo F:** Interfaz de entrada del programa: guía de utilización.
- **Anexo G:** Validación de los distintos elementos.
- **Anexo H:** Validación de configuraciones.
- **Anexo I:** Validación de la configuración *Malla (Bifurcación)*.

2. Modelado de elementos

En el presente capítulo se muestra una breve descripción del modelado de cada uno de los elementos implementados en el programa. Para mayor información, en el Anexo B se presenta una descripción más detallada.

Debido a que el programa ha sido diseñado de forma que pueda soportar cálculos en situaciones de bloqueo sónico del flujo, el primer paso antes de resolver cualquier elemento que se considere que pueda llegar a bloquearse es calcular su gasto másico de bloqueo (\dot{m}_b), de forma que se conozca de antemano si el elemento se encuentra bloqueado ($\dot{m} \geq \dot{m}_b$) o no lo está ($\dot{m} < \dot{m}_b$). Si se detecta que $\dot{m} > \dot{m}_b$, el elemento considerado bloquea para un gasto másico inferior al que se quiere hacer circular por él, de lo que se concluye la imposibilidad de que por la línea circule el gasto másico impuesto \dot{m} . Los elementos que se han considerado que pueden presentar bloqueo sónico son los siguientes: *Tramo Recto*, *Cambio de Sección convergente*, *Válvula* y *Orificios*.

En el método de resolución de todos los elementos implementados se ha supuesto:

- Flujo estacionario unidimensional
- Gas ideal

2.1 Tramo Recto

El elemento *Tramo Recto* corresponde a un conducto recto de sección constante (tanto circular como cualquier otra) y fricción no despreciable. Se han implementado dos métodos de cálculo:

- **Tramo recto adiabático:** se considera que no hay transmisión de calor entre el fluido y el exterior de la tubería, por lo que al acelerarse el flujo debido a la pérdida de presión, la temperatura debe descender para mantener la energía total constante. Incluso para tuberías no adiabáticas, este modelo sigue siendo adecuado para flujo con elevadas velocidades y longitudes de tubería relativamente cortas [1]. El bloqueo o estrangulamiento del flujo se produce cuando éste alcanza la velocidad del sonido, es decir, cuando $Ma=1$.
- **Tramo recto isotermo:** en este caso se considera que la temperatura del fluido se mantiene constante a lo largo de la tubería, por lo que inevitablemente debe existir una transferencia de calor con el exterior. Este modelo es adecuado para tuberías con grandes longitudes, como por ejemplo, gasoductos [1]. El bloqueo del flujo se produce cuando éste alcanza un $Ma = 1/\sqrt{\gamma}$ [1]. Para el aire ($\gamma=1.4$), el estrangulamiento del flujo se produce para un $Ma=0.845$.

Además de la elección del método de cálculo, el elemento Tramo Recto queda definido por los valores de longitud, diámetro (diámetro hidráulico si el conducto no fuese de sección circular) y rugosidad absoluta.

2.2 Codo

El elemento *Codo* se ha modelado suponiéndolo perfectamente adiabático. Para calcular la pérdida de presión ocasionada al flujo se ha utilizado la siguiente ecuación [2]:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot K_{codo} \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 \quad (2.1)$$

La constante de pérdidas (K_{codo}) se obtiene de [2], que especifica los valores de este coeficiente en función de la geometría, válidos para codos de paredes concéntricas y sección constante. Se han introducido al programa las tablas correspondientes de forma que, tras introducir el usuario los parámetros del codo (diámetro, radio de curvatura y rugosidad), el programa calcule el valor de la constante de pérdidas.

Tras obtener mediante la Ecuación (2.1) la presión a la salida del codo se calcula la temperatura mediante un balance de energía:

$$C_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.2)$$

2.3 Cambio de sección

El elemento *Cambio de Sección* se ha modelado teniendo en cuenta que la presión varía debido a dos efectos distintos: cambio en la velocidad y pérdidas de presión irreversibles. Es decir, se considera flujo adiabático no isoentrópico (cabe destacar que gran parte de los códigos comerciales no considera el segundo efecto, suponiendo flujo isoentrópico).

La ecuación utilizada para modelar el elemento es la siguiente [2]:

$$P_2 = P_{2s} - \frac{1}{2} \cdot K \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.3)$$

Refiriéndose K , ρ y v siempre a la sección de menor diámetro, es decir:

- a) La sección de entrada si es un cambio de sección divergente: K_1, ρ_1, v_1
- b) La sección de salida si es un cambio de sección convergente: K_2, ρ_2, v_2

El parámetro K se obtiene de [2] a partir de las propiedades características del cambio de sección introducido por el usuario (diámetros de entrada y salida, longitud y rugosidad).

P_{2s} corresponde a la presión de salida del cambio de sección si se considerase el flujo como isoentrópico, es decir, si se despreciasen las pérdidas irreversibles introducidas por el coeficiente de pérdidas.

La resolución es distinta si el cambio de sección es convergente (estrechamiento) o divergente (ensanchamiento):

- a) Cambio de sección divergente: la resolución es prácticamente inmediata, ya que se dispone de los valores de ρ_1 y v_1 . Además, no hay posibilidad de que se produzca bloqueo sónico.
- b) Cambio de sección convergente: no se dispone de los valores de ρ_2 y v_2 , que dependen de las propiedades de salida (P_2 y T_2) que se desean calcular. Se plantea un sistema con

la Ecuación (2.3), la ecuación de continuidad y la de conservación de la energía, de forma que la solución encontrada satisfaga todas ellas.

Además, en este caso se puede producir el fenómeno del bloqueo sónico, por lo que antes de la resolución del elemento se debe calcular \dot{m}_b considerando las pérdidas de presión irreversibles.

2.4 Válvula

El elemento *Válvula* ha sido implementado suponiendo flujo adiabático. Para calcular la pérdida de presión ocasionada al flujo se ha utilizado la Ecuación (2.4) [3], de uso común en válvulas por las que circule un fluido compresible (gas o vapor).

$$\dot{m} = C_v \cdot N_8 \cdot F_p \cdot P_1 \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{x \cdot M}{T_1 \cdot Z}} \quad (2.4)$$

Donde:

- C_v es el coeficiente de flujo de la válvula
- N_8 es una constante de ajuste de unidades
- F_p es un factor de pérdidas dependiente de la geometría de la válvula
- x es la pérdida de presión relativa producida en la válvula:

$$x = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2.5)$$

El valor de x nunca puede ser superior a x_T (valor de x que presenta la válvula cuando se encuentra bloqueada; es un valor característico de la válvula que debe proporcionar el fabricante).

- Y es el factor de expansión del gas:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \cdot \frac{\gamma}{1.40} \cdot x_T} \quad (2.6)$$

A través de la Ecuación (2.4) se puede obtener P_2 tanto si la válvula se encuentra bloqueada como si no lo está (en este último caso, bastaría con fijar $x = x_T$). Respecto a T_2 , ésta se calcula mediante un balance de energía.

El elemento *Válvula* se modela introduciendo los diámetros de entrada y salida, el C_v y x_T .

2.5 Compresor

El elemento *Compresor* se ha modelado de dos formas distintas, dando al usuario la opción de escoger cualquiera de ellas:

- a) Introduciendo un ratio de presión y un rendimiento isoentrópico constantes.
- b) Introduciendo las curvas características del compresor, de forma que, dependiendo del gasto másico que circule por la línea, se obtenga un ratio de presión y un rendimiento isoentrópico diferente. El usuario debe introducir dos curvas características (la de ratio de presión y la de rendimiento isoentrópico), disponiendo de dos opciones para hacerlo:

b1) Mediante la introducción directa de los coeficientes de la ecuación de segundo grado que mejor se ajuste a cada una de las curvas.

b2) Mediante la introducción de hasta 10 puntos de funcionamiento del compresor para cada curva. El programa se encargará de obtener mediante el método de mínimos cuadrados las dos curvas que mejor ajusten a dichos puntos.

2.6 Orificios

El elemento *Orificios* se ha modelado a través de la Ecuación (2.7) [4], suponiendo flujo isoentrópico hasta la desembocadura del orificio.

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot \frac{P_1^0}{\sqrt{R \cdot T_1^0}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1^0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1^0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (2.7)$$

Donde:

- C_d es el coeficiente de descarga del orificio
- A el área de paso del orificio

El coeficiente de descarga (C_d) puede ser tanto introducido por el usuario como estimado por el programa en función de las dimensiones del orificio, en concreto, de su relación de aspecto (espesor / diámetro) [5].

Partiendo de un gasto másico \dot{m} y unas propiedades de entrada (P_1^0, T_1^0) conocidas, se resuelve la Ecuación (2.7) para calcular P_2 . Los orificios se consideran bloqueados cuando P_2 alcanza su valor crítico [1]:

$$P_{2,crit} = P_1^0 \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (2.8)$$

A través de las Ecuaciones (2.7) y (2.8) se puede calcular de forma inmediata el gasto másico de bloqueo del elemento para las condiciones de entrada (P_1^0, T_1^0) especificadas.

Tras la salida del flujo del orificio, se supone que la presión estática se mantiene constante, considerando que la diferencia de presión dinámica entre la zona de vena contracta y la sección de salida corresponde a las pérdidas irreversibles debidas al ensanchamiento de la sección de paso.

La temperatura en la salida, T_2 , se calcula mediante un balance de energía considerando que el elemento es perfectamente adiabático.

El elemento *Orificios* se modela introduciendo los diámetros de entrada y salida, el número de orificios, las características de éstos (diámetro y espesor), y en caso de conocerse, el valor del coeficiente de descarga.

3 Método de cálculo de líneas y redes de conductos

En el presente capítulo se describe brevemente el método de cálculo utilizado para cada una de las configuraciones disponibles por el usuario:

- Línea Simple: sucesión de cualquier combinación de los elementos descritos en el capítulo anterior. Como se ha dicho anteriormente, se dispone de dos modos de cálculo:
 - *Línea Simple A*: el usuario fija un gasto másico circulante por la línea, y desea calcular las condiciones a la salida de ésta (P_2 , T_2).
 - *Línea Simple B*: el usuario asigna una presión de salida, deseando calcular el gasto másico circulante por la línea (\dot{m}).

En el Anexo C se describe en más detalle el método de resolución empleado en ambos casos.

- Malla: combinación de cuatro líneas simples y dos nodos según lo dispuesto en el siguiente esquema:

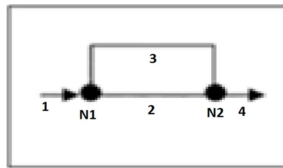


Figura 3.1. Esquema de la configuración *Malla*

El usuario fija el gasto másico entrante por la línea 1, quedando como incógnita el reparto de gastos másicos por las líneas 2 y 3. En el Anexo D se amplía información acerca del método de resolución empleado para la configuración *Malla*.

- División de Flujo: combinación de tres líneas simples y un nodo según lo dispuesto en el siguiente esquema:

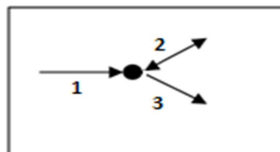


Figura 3.2. Esquema de la configuración *División de Flujo*

El usuario especifica el gasto másico entrante por la línea 1, así como la presión de remanso en el extremo de la línea 2, deseando conocer los gastos másicos circulantes por las líneas 2 y 3. El gasto másico entrante por la línea 1 es positivo, pero esto no implica que ambas líneas 2 y 3 deban descargar del nodo, sino que una de ellas puede alimentar al nodo (nunca las dos, para que la suma sea un caudal neto de descarga igual al de la línea 1). El programa es flexible en este sentido, permitiendo que la línea 2 pueda actuar tanto como de descarga como de alimentación de nodo en función de

los datos del problema (la línea 3 es siempre de descarga de nodo). El método de resolución empleado en este caso se explica en el Anexo E.

3.1 Método de cálculo de *Línea Simple*

La configuración *Línea Simple* es el módulo básico mediante el que se construyen las distintas configuraciones. Por este motivo, el método de solución utilizado en cualquiera de ellas se apoya en las rutinas de cálculo desarrolladas para la *Línea Simple*. Se resume a continuación el método de cálculo utilizado.

3.1.1 *Línea Simple A*

Para la configuración *Línea Simple A*, en la que se conocen las condiciones de entrada (P_1, T_1) y el gasto másico (\dot{m}), el método de resolución es simple: ir resolviendo secuencialmente elemento a elemento, asignando la presión y temperatura de salida de un elemento como presión y temperatura de entrada del siguiente hasta llegar al final de la línea.

Se ha diseñado el programa de forma que compruebe automáticamente si el gasto másico fijado es posible o no y, en caso de que se detectase una restricción al flujo (tanto por bloqueo sónico en algún elemento como por quedar fuera de los límites de operación de un compresor), el programa recalcula el gasto másico límite que podría circular por la línea evaluada, avisando al usuario de la limitación encontrada. Éste tendría la opción de recalcular la línea con su gasto másico límite o de finalizar la ejecución del programa para revisar los datos de entrada.

3.1.2 *Línea Simple B*

Para la configuración *Línea Simple B*, en la que se conocen las propiedades de entrada (P_1, T_1) y salida (P_2, T_2) de la línea (que pueden ser tanto estáticas como de remanso en función de la selección del usuario), y se desea calcular el gasto másico circulante (\dot{m}), el método de resolución es el siguiente:

1. Distinguir si, bajo las condiciones de entrada y salida fijadas, la línea se encuentra bloqueada o no:
 - Cálculo del gasto másico máximo que puede circular por la línea (\dot{m}_{max}). Esto se hace utilizando el método de solución de *Línea Simple A*: la línea se resuelve con gastos másicos cada vez mayores hasta que se detecta bloqueo sónico en alguno de sus elementos. Una vez obtenido un caudal superior al de bloqueo el programa automáticamente calcula el correspondiente caudal de bloqueo de la línea (\dot{m}_{max}).
 - Cálculo de la presión de salida de la línea cuando por ella circula \dot{m}_{max} : $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{max})$. Este valor de presión es el mínimo alcanzable a la salida de la línea, ya que el gasto másico no puede aumentarse por encima de \dot{m}_{max} . En este punto se evalúa:
 - Si $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{max}) < P_2$ el gasto másico solución (\dot{m}_{sol}) es inferior a \dot{m}_{max} . Se sabe con certeza entonces que la línea no se encuentra bloqueada.
 - Si $P_2(\dot{m} = \dot{m}_{max}) > P_2$ aun calculando la línea con su gasto másico máximo posible se tiene una presión de salida superior a la P_2 fijada

por el usuario. Se determina entonces que la línea se encuentra bloqueada.

2. Una vez se conoce si la línea se encuentra bloqueada o no, se resuelve el caso correspondiente:

a) Si la línea no se encuentra bloqueada: el problema consiste en buscar un valor de \dot{m}_{sol} tal que:

$$P_2(\dot{m} = \dot{m}_{sol}) = P_2 \quad (3.1)$$

Para ello se utilizan métodos iterativos en los que, mediante la asignación de distintos valores de gasto másico, se consiga cumplir la condición anterior.

b) Si la línea se encuentra bloqueada: el gasto másico debe ser aquél para el cual la línea bloquea, es decir:

$$\dot{m}_{sol} = \dot{m}_{max} \quad (3.2)$$

El problema en este caso es el cálculo de las pérdidas de presión irreversibles causadas por las ondas de choque producidas a la salida de los elementos bloqueados (más detalles en Anexo C). Estas pérdidas deben de ser tales que la presión a la salida de la línea coincida con la P_2 fijada por el usuario. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Calcular con el gasto másico de bloqueo la línea aguas arriba del elemento bloqueado, incluyéndolo. La presión a la salida de dicho elemento será su presión crítica (P_{crit}).
- Se resuelve la línea aguas abajo del elemento bloqueado aplicando a la salida de éste caídas de presión por onda de choque (ΔP_{onda}) cada vez mayores hasta conseguir uno de los siguientes efectos:
 - a) Alcanzar el valor de presión a la salida de la línea fijada por el usuario (P_2).
 - b) Bloquear otro elemento aguas abajo del primero. La ΔP_{onda} aplicada a la salida del primer elemento bloqueado se calcula de forma que el gasto másico de bloqueo del nuevo elemento sea exactamente igual al del primero (\dot{m}_{sol}). Se tienen pues dos elementos bloqueados en serie, y se comenzarán a aplicar pérdidas irreversibles a la salida del segundo elemento hasta lograr conseguir el valor especificado por el usuario para la presión en la desembocadura de la línea. Esta operación se repite siempre que se bloquee un elemento hasta llegar al final de la línea.

Cada vez que el programa aplica una caída de presión adicional debida a una onda de choque, se calcula la temperatura tras la onda de choque suponiendo que el proceso es perfectamente adiabático.

3.2 Método de cálculo de *Malla*

La configuración *Malla* puede dar lugar a dos casos distintos, dependiendo del sentido que lleve el flujo en sus ramales en paralelo (líneas 2 y 3 en la Figura 3.1):

- *Bifurcación*: el flujo en ambos ramales lleva el mismo sentido: desde el primer nodo (N1) hacia el segundo (N2). En este caso el balance de materia a realizar es:

$$\dot{m}_{L1} = \dot{m}_{L2} + \dot{m}_{L3} \quad (3.3)$$

- *Recirculación*: Este caso puede darse únicamente cuando hay un compresor en uno de los ramales, de manera que en esa línea el flujo va del N1 al N2, mientras que en el otro ramal (línea de recirculación) el flujo se dirige del N2 al N1. El balance de materia a realizar es:

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{L1} + \dot{m}_{recirc} \quad (3.4)$$

3.2.1 Detección del caso de aplicación: *Bifurcación o Recirculación*

En primer lugar, el programa debe detectar en cuál de los dos casos se encuentra, para lo cual utiliza la siguiente estrategia:

1. Detección de la presencia de compresores en los ramales en paralelo de la *Malla*:
 - a. Si ninguna de las líneas posee compresores, o ambas los tienen, se determina que el caso a resolver es una *Bifurcación*, por lo que se pasa directamente a su resolución.
 - b. En caso contrario, podría existir tanto una *Recirculación* como una *Bifurcación*. Se pasa al punto 2.
2. Cálculo de los gastos másicos mínimo (\dot{m}_{min}) y máximo (\dot{m}_{max}) que pueden circular por la línea del compresor. El primero es el gasto másico tal que el compresor opera en su límite de bombeo, mientras que el segundo es aquel valor del gasto másico que hace que, o bien un elemento de la línea se bloquee, o bien hace operar al compresor en su límite de bloqueo. Se evalúa:
 - a. Si $\dot{m}_{min} > \dot{m}_{L1}$ se determina que el problema introducido es una *Recirculación*, debido a que solamente en este caso puede cumplirse que $\dot{m}_{comp} > \dot{m}_{L1}$ (véase Ecuación (3.4)).
 - b. Si $\dot{m}_{max} < \dot{m}_{L1}$ se determina que el problema introducido es una *Bifurcación*, debido a que únicamente en este caso puede cumplirse que $\dot{m}_{comp} < \dot{m}_{L1}$.
 - c. Si $\dot{m}_{min} \leq \dot{m}_{L1} \leq \dot{m}_{max}$ ambos casos son posibles. Se pasa al punto 3.
3. Cálculo de la presión de remanso a la salida de la línea del compresor (P_{N2}^0) para los caudales límite del compresor, \dot{m}_{min} y \dot{m}_{max} . Estas presiones se comparan con la presión calculada en el nodo 1 (P_{N1}^0):
 - a. Si $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{max}) > P_{N1}^0$ implica que, incluso para el mayor gasto másico posible en la línea del compresor, la presión del nodo 2 es mayor a la presión

del nodo 1, por lo que el flujo debe ir de 2 a 1 y se trata de un caso de *Recirculación*.

- b. Si $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{min}) < P_{N1}^0$, aunque se imponga a la línea del compresor el gasto mínimo posible, la presión del nodo 2 es menor a la presión del nodo 1, por lo que se produce una *Bifurcación*.
- c. Si $P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{max}) \leq P_{N1}^0 \leq P_{N2}^0(\dot{m} = \dot{m}_{min})$, dependiendo del gasto másico que circule por la línea del compresor se puede tener una *Recirculación* o una *Bifurcación*. Se pasa al punto 4 para determinarlo.

4. Cálculo del gasto másico límite (\dot{m}_{lim}), definido como el gasto másico para el cual $P_{N2}^0 = P_{N1}^0$ como se puede observar en la Figura 3.3.

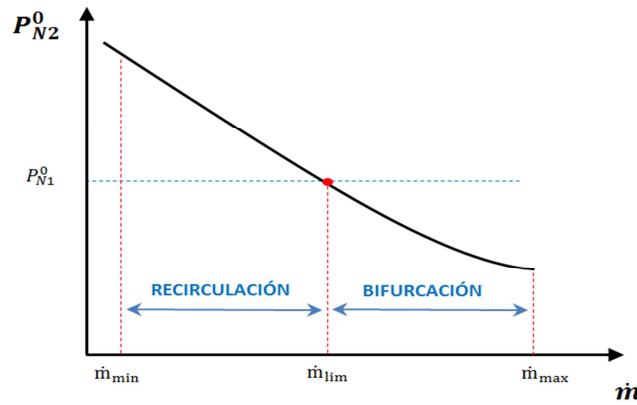


Figura 3.3. Cálculo del gasto másico límite entre *Bifurcación* y *Recirculación*

Tras el cálculo de \dot{m}_{lim} , se evalúa:

- a. Si $\dot{m}_{lim} > \dot{m}_{L1}$: El gasto másico para el cual la *Malla* pasaría a trabajar como *Bifurcación* es mayor que el gasto másico de la línea 1, haciendo imposible un caso *Bifurcación*. El problema a resolver es una *Recirculación*.
- b. Si $\dot{m}_{lim} < \dot{m}_{L1}$: El gasto másico para el cual la *Malla* pasaría a trabajar como *Recirculación* es menor que el gasto másico de la línea 1. El problema a resolver es una *Bifurcación*.

Tras aplicar esta secuencia de comprobaciones se conoce con seguridad si el caso a resolver es una *Bifurcación* o una *Recirculación* y se procede a su resolución.

3.2.2 Resolución del caso *Bifurcación*

Las configuraciones de *Malla* de tipo *Bifurcación* se resuelven aplicando el siguiente método:

1. Resolver la línea 1 normalmente con su gasto másico \dot{m}_{L1} . A su salida se obtienen las propiedades de remanso del nodo 1 (P_{N1}^0 y T_{N1}^0).
2. Los gastos másicos de las líneas 2 y 3 deben cumplir la Ecuación (3.3), pero no se conoce exactamente su reparto, que ha de ser aquél para el cual la presión de remanso de ambas líneas a su salida (P_{N2}^0) se iguale. Hay que tener en cuenta que puede existir bloqueo sónico en una o en ambas líneas, por lo que para poder resolver todos los casos posibles se sigue la siguiente estrategia:

- Detectar si, con el gasto másico total a repartir entre las dos líneas (\dot{m}_{L1}), existe la posibilidad de bloqueo en alguna de las dos líneas.
- En caso de que alguna de las líneas pudiera bloquearse con \dot{m}_{L1} , comprobar si efectivamente esto ocurre realmente o no. Para ello se calcula dicha línea con su gasto másico de bloqueo (\dot{m}_b), y la otra línea con un gasto másico: $\dot{m} = \dot{m}_{L1} - \dot{m}_b$. Se compara la presión de remanso obtenida a la salida de ambas líneas:
 - i. Si la presión de salida de la línea bloqueada es mayor que la presión de salida de su ramal paralelo, se comprueba que efectivamente la línea considerada se encuentra bloqueada, ya que aun aplicando a dicha línea su gasto másico máximo y a su ramal paralelo su gasto mínimo posible, la presión a la salida de la primera sigue siendo superior a la de la segunda.
 - ii. Si por el contrario la presión de salida de la línea bloqueada es menor que la presión de salida de su ramal paralelo, esto significa que la línea considerada no se encuentra bloqueada.
- Una vez se conoce con seguridad si existe o no bloqueo en las dos líneas estudiadas, se resuelve según el caso:
 - i. Si no existe bloqueo en ninguna de las líneas:
Se emplea un algoritmo iterativo que vaya asignando gastos másicos a las líneas 2 y 3 hasta conseguir una solución que cumpla que ambas líneas presenten la misma presión de remanso a su salida (P_{N2}^0).
 - ii. Si existe bloqueo en una de las líneas:
Se resuelve la línea no bloqueada con un gasto másico:

$$\dot{m} = \dot{m}_{L1} - \dot{m}_b \quad (3.5)$$

Y se asigna su presión de salida como P_{N2}^0 . La línea bloqueada se resuelve mediante el método de cálculo *Línea Simple B*, explicado en el apartado 3.1.2 del presente capítulo, dadas unas presiones conocidas P_{N1}^0 y P_{N2}^0 . Se sabe que la línea va a bloquear con un gasto másico \dot{m}_b y se van a producir ondas de choque que reducirán la presión de salida hasta el valor de P_{N2}^0 fijado por su ramal paralelo.

- iii. Si existe bloqueo en ambas líneas:
En este caso el gasto másico \dot{m}_{L1} es aquél que bloquea exactamente ambos ramales en paralelo. Si esto ocurre, se calcula la presión de

salida de ambas líneas con sus gastos másicos de bloqueo y asigna la menor de ellas como P_{N2}^0 . El resto de la resolución es análoga a la explicada para el caso anterior.

Tras el cálculo de las líneas 2 y 3 se pueden calcular las propiedades del nodo 2:

- La presión de remanso a la salida de ambas líneas debe ser prácticamente igual (se impone un error relativo máximo de 10^{-4}), por lo que:

$$P_{2,L2}^0 = P_{2,L3}^0 = P_{N2}^0 \quad (3.6)$$

- La temperatura de remanso a la salida de ambas líneas por el contrario puede ser distinta, por lo que se realiza un balance de energía:

$$\dot{m}_{L2} \cdot T_{2,L2}^0 + \dot{m}_{L3} \cdot T_{2,L3}^0 = (\dot{m}_{L2} + \dot{m}_{L3}) \cdot T_{N2}^0 \quad (3.7)$$

3. Tras resolver las líneas 2 y 3, y conociendo la presión y temperatura del nodo 2, se puede resolver la línea 4 normalmente con un gasto másico:

$$\dot{m}_{L4} = \dot{m}_{L2} + \dot{m}_{L3} = \dot{m}_{L1} \quad (3.8)$$

Finalizándose con esto la resolución del caso *Malla Bifurcación*.

3.2.3 Resolución del caso *Recirculación*

Si se ha determinado que la *Malla* introducida es un caso *Recirculación*, se utiliza el siguiente método de cálculo:

1. Resolver la línea 1 normalmente con su gasto másico \dot{m}_{L1} . A su salida se obtienen $P_{2,L1}^0$ y $T_{2,L1}^0$. En este caso el nodo 1 es un punto de mezcla, por lo que se tiene que:

$$P_{2,L1}^0 = P_{2,recirc}^0 = P_{1,comp}^0 = P_{N1}^0 \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_{L1} \cdot T_{2,L1}^0 + \dot{m}_{recirc} \cdot T_{2,recirc}^0 = \dot{m}_{comp} \cdot T_{1,comp}^0 \quad (3.10)$$

Según las ecuaciones anteriores la presión del nodo 1 está fijada (P_{N1}^0), pero la temperatura se desconoce, ya que no se dispone de las propiedades de salida de la línea de recirculación. Se implementa un bucle que engloba la totalidad del procedimiento que se explica a continuación, y que irá recalculando la temperatura en el nodo 1 hasta que se cumpla la Ecuación (3.10).

2. Resolver las líneas del compresor y de recirculación partiendo del valor de P_{N1}^0 (fijo en todas las iteraciones) y $T_{1,comp}^0$ (variable en cada iteración). El objetivo dentro de cada iteración es resolver ambas líneas con unos gastos másicos tales que:
 - Se cumpla el balance de materia (véase Ecuación (3.4)).

- La presión a la salida de la línea de recirculación converja a su valor fijado P_{N1}^0 (véase Ecuación (3.9)).

Para ello se sigue la siguiente estrategia:

- Se calcula el gasto másico máximo ($\dot{m}_{comp,max}$) y mínimo ($\dot{m}_{comp,min}$) que puede pasar por la línea del compresor.
- Basándose en la Ecuación (3.4) se define:

$$\dot{m}_{recirc,max} = \dot{m}_{comp,max} - \dot{m}_{L1} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{recirc,min} = \dot{m}_{comp,min} - \dot{m}_{L1} \quad (3.12)$$

Téngase en cuenta que los valores de $\dot{m}_{recirc,min}$ y $\dot{m}_{recirc,max}$ vienen dados por los cálculos realizados sobre la línea del compresor, por lo que la línea de recirculación puede tener un gasto másico máximo distinto de $\dot{m}_{recirc,max}$, es decir, se puede bloquear para un gasto másico $\dot{m}_{recirc,b}$ que seguramente sea distinto a $\dot{m}_{recirc,max}$.

Se ha llegado a la conclusión de que existen dos posibles soluciones, dependiendo de si la línea de recirculación se encuentra bloqueada o no lo está. En la Figura 3.4 se muestran esquemáticamente ambas:

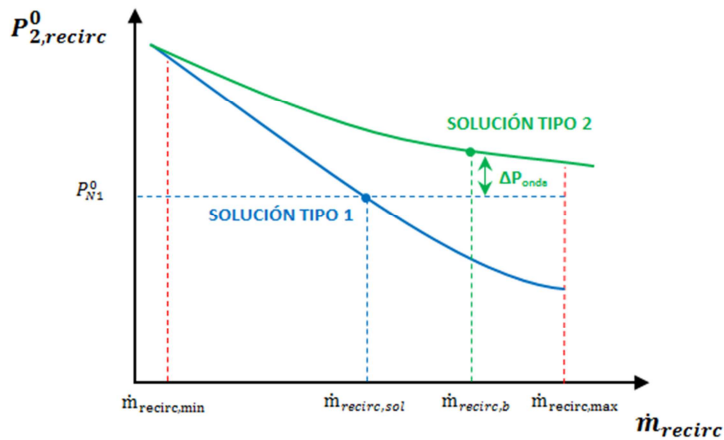


Figura 3.4. Ilustración gráfica de las dos posibles soluciones que pueden encontrarse en el caso *Recirculación*

- Solución tipo 1: existe un gasto másico $\dot{m}_{recirc,sol}$ inferior al gasto másico de bloqueo ($\dot{m}_{recirc,b}$) tal que la presión de remanso a la salida de la línea de recirculación ($P_{2,recirc}^0$) es igual a la presión de remanso calculada para el nodo 1 (P_{N1}^0). La línea de recirculación no se encuentra bloqueada.
- Solución tipo 2: aun aplicando el mayor gasto másico posible ($\dot{m}_{recirc,b}$), la presión de salida de la línea de recirculación ($P_{2,recirc}^0$) resulta superior a la

presión fijada por el nodo 1 (P_{N1}^0). La línea de recirculación se encuentra bloqueada con un gasto másico $\dot{m}_{recirc,b}$, y en ella se producirán pérdidas de presión irreversibles debidas a ondas de choque (ΔP_{onda}) de forma que ambas presiones se igualen.

Una vez se conoce qué dos tipos de soluciones se puede encontrar, el programa procede a determinar cuál de ellas debe buscar. Para ello se aplica la siguiente secuencia:

- Comprobar si la línea de recirculación bloquea con un gasto másico $\dot{m}_{recirc,max}$, pudiendo encontrarse distintas situaciones:
 - a) Tras resolver la línea del compresor con $\dot{m}_{comp,max}$ (recuérdese la Ecuación (3.11)), se tiene que es imposible hacer circular $\dot{m}_{recirc,max}$ por la línea de recirculación, que bloquea para un gasto másico inferior $\dot{m}_{recirc,b}$. En este caso, se tiene la situación mostrada en la Figura 3.4, y pueden existir ambas soluciones.
 - b) Si la línea de recirculación no bloquea para $\dot{m}_{recirc,max}$, en ningún caso se alcanzarán condiciones de bloqueo y se calcula la presión a la salida de la línea de recirculación como sigue:
 - Si $P_{2,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,max}) < P_{N1}^0$: Es una solución tipo 1 (véase Figura 3.4).
 - Si $P_{2,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,max}) > P_{N1}^0$: No existe solución a la Recirculación introducida, probablemente debido a los límites de operación introducidos para el compresor. Se avisa al usuario y se termina la ejecución.
- Si se ha determinado que pueden existir ambas soluciones, se calcula iterativamente el gasto másico de bloqueo de la línea de recirculación ($\dot{m}_{recirc,b}$), que se sabe acotado entre $\dot{m}_{recirc,min}$ y $\dot{m}_{recirc,max}$. Una vez encontrado el valor de $\dot{m}_{recirc,b}$ se resuelve la línea de recirculación con dicho gasto másico, y se evalúa su presión de remanso a la salida de la línea:
 - Si $P_{2,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,b}) < P_{N1}^0$: Se tiene una solución tipo 1 (véase Figura 3.4).
 - Si $P_{2,recirc}^0(\dot{m}_{recirc,max}) > P_{N1}^0$: Se tiene una solución tipo 2 (véase Figura 3.4).

Llegado a este punto el programa conoce exactamente si debe buscar una solución tipo 1 o tipo 2, por lo que resuelve el caso correspondiente:

- Si la solución es de tipo 1, se emplea un algoritmo iterativo que vaya asignando gastos másicos \dot{m}_{recirc} entre los límites encontrados hasta encontrar un gasto másico tal que se cumpla la Ecuación (3.9).
- Si la solución es de tipo 2 se sigue el siguiente método de cálculo:

- Se resuelve la línea del compresor con $\dot{m}_{comp} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{recirc,b}$, obteniendo las propiedades del nodo 2 (P_{N2}^0 y T_{N2}^0).
- Se conoce que la línea de recirculación se encuentra bloqueada con un gasto másico $\dot{m}_{recirc,b}$, y que se encuentra situada entre unas condiciones conocidas de presión y temperatura en ambos extremos. Se resuelve entonces mediante el método de cálculo *Línea Simple B*, explicado en este mismo capítulo; para ajustar la presión de salida a P_{N1}^0 se producirán caídas de presión irreversibles por onda de choque.

Una vez se han resuelto las líneas del compresor y de recirculación, se obtiene una presión de salida de la línea de recirculación que cumple la Ecuación (3.9). No obstante, la $T_{2,recirc}^0$ obtenida puede hacer que no se cumpla el balance de energía de la Ecuación (3.10). Se evalúa esta ecuación, recalculando el valor de $T_{1,comp}^0$:

- a) Si el nuevo $T_{1,comp}^0$ se encuentra dentro del intervalo de $\pm 1^\circ\text{C}$ respecto del valor de $T_{1,comp}^0$ supuesto en la presente iteración, se da por buena la solución.
- b) En caso contrario se reasigna un nuevo valor de $T_{1,comp}^0$ y se recalculan las líneas del compresor y de recirculación.

3. Tras la resolución de los ramales en paralelo, se resuelve normalmente la línea 4 con un gasto másico:

$$\dot{m}_{L4} = \dot{m}_{comp} - \dot{m}_{recirc} = \dot{m}_{L1} \quad (3.13)$$

Y partiendo de las propiedades de remanso calculadas para el nodo 2 (P_{N2}^0 y T_{N2}^0).

3.3 Método de cálculo de *División de Flujo*

La configuración *División de Flujo* consiste en un sistema de tres líneas conectadas por un nudo común y requiere un método de cálculo distinto del descrito para el caso de *Malla*.

En primer lugar debe resolverse la línea 1, conocidos los valores de la presión de entrada y de su gasto másico \dot{m}_{L1} . A la salida de esta línea se obtiene la presión de remanso del nodo (P_N^0). Esta presión se compara con la presión de remanso fijada por el usuario al final de la línea 2, que puede suponerse como la presión de un depósito (real o ficticio) situado al final de dicha línea (P_{Dep}^0):

- a. Si $P_N^0 > P_{Dep}^0$: La línea 2 actúa como descarga de nodo.

El sentido del flujo en la línea 2 va desde el nodo hacia el depósito, por lo que tanto la línea 2 como la 3 actúan como descarga de nodo, y el balance de materia a aplicar es:

$$\dot{m}_{L1} = \dot{m}_{L2} + \dot{m}_{L3} \quad (3.14)$$

Puesto que se conocen las condiciones de presión y temperatura en los extremos de la línea 2, se resuelve ésta mediante el método de cálculo *Línea Simple B*, explicado en este mismo capítulo.

Una vez resuelta la línea 2, se calcula el gasto másico circulante por la línea 3 según la Ecuación (3.14), y se evalúa:

- Si $\dot{m}_3 < 0$ el problema especificado no se puede calcular, ya que la configuración *División de Flujo* ha sido creada considerando que la línea 3 siempre actuará como descarga de nodo. Se detiene la ejecución del programa, avisando al usuario del motivo.
- Si $\dot{m}_3 \geq 0$ el problema se puede resolver. Se calcula la línea 3 normalmente partiendo de las propiedades calculadas para el nodo (P_N^0 y T_N^0).

- b. Si $P_N^0 < P_{Dep}^0$: La línea 2 actúa como alimentación de nodo.

El sentido del flujo en la línea 2 va desde el depósito hacia el nodo, por lo que la única línea que actúa como descarga de nodo es la línea 3, y el balance de materia a aplicar es:

$$\dot{m}_{L3} = \dot{m}_{L1} + \dot{m}_{L2} \quad (3.15)$$

Puesto que se conocen las condiciones de presión y temperatura en los extremos de la línea 2, se resuelve ésta mediante el método de cálculo *Línea Simple B*, explicado en este mismo capítulo.

Una vez resuelta la línea 2, se calcula el gasto másico circulante por la línea 3 según la Ecuación (3.15), y se resuelve normalmente partiendo de las propiedades calculadas para el nodo.

4. Descripción del programa

En el presente capítulo se resume la estructura y principales características del programa desarrollado, que ha sido bautizado como *CHIEF* (Cálculo Hidráulico de Elementos e Instalaciones de Flujo compresible). Éste puede dividirse en tres módulos principales:

- **Interfaz de entrada:** mediante la que el usuario debe especificar las características del problema que desea resolver. Dicha interfaz ha sido realizada en *Microsoft Excel* con la asistencia de *Visual Basic for Applications* (VBA) para la creación de ventanas emergentes, cuadros de selección y otros controles de formulario.
- **Herramienta de cálculo (*Solver*):** núcleo del programa, se encarga de cargar los datos introducidos por el usuario en la interfaz de entrada, resolver el problema y exportar los datos a la interfaz de salida. La herramienta de cálculo ha sido implementada en *Matlab*, y basa su funcionamiento en los métodos de cálculo descritos en los capítulos 2 y 3 de la presente Memoria.
- **Interfaz de salida:** archivo *Excel* donde la herramienta de cálculo escribe los resultados de la resolución de forma que puedan ser evaluados por el usuario.

En capítulos previos se han descrito las ecuaciones y procedimientos utilizados para el cálculo. El volumen de operaciones matemáticas depende del caso concreto y, para dar una idea, el tiempo de cálculo puede variar desde unos pocos segundos hasta unos 20 minutos en los casos más complejos, como la malla con recirculación (para un PC del año 2011, con Windows 7 y procesador Intel Core i5 @ 2.40 GHz). A continuación se describen brevemente las interfaces de entrada y salida de datos.

4.1 Interfaz de entrada

La interfaz de entrada incluye tanto el sistema de introducción de datos como toda una serie de verificaciones de consistencia que detecten la entrada de datos erróneos o que estén fuera de los límites de lo que el programa es capaz de resolver, reduciendo la probabilidad de aparición de posibles errores durante la posterior resolución en *Matlab*. Además, se ha intentado que la interfaz sea intuitiva y fácil de usar para cualquier usuario, al cual se guía paso a paso desde el principio hasta el final de la introducción de datos.

El archivo Excel posee 6 hojas de cálculo y 48 formularios de *Visual Basic*, por lo que aquí únicamente se expondrán brevemente las opciones de que dispone el usuario a la hora de definir su instalación. En el Anexo F se presenta una guía completa de utilización, donde el lector podrá ver paso a paso su aspecto y modo de uso. La captura de pantalla de la Figura 4.1 muestra la apariencia general de la interfaz de entrada de datos del programa.

SISTEMA DE ENTRADA DE DATOS DE LA INSTALACIÓN PARA SISTEMAS DE TIPO A

NOTA: Introducir todos los valores numéricos con punto como separador decimal

→ Configuración escogida: Matlab
 Número de Líneas Simples: 4

0. Borrar datos previos

Si se trata de un proyecto nuevo, se recomienda borrar datos de instalaciones previas:

Borrar datos ?

2. Selección de Línea Simple a modificar

Seleccione la Línea Simple que desea modificar:

Línea Simple 1
Línea Simple 2
 Línea Simple 3
 Línea Simple 4

Seleccionar Línea Simple

1. Introducir datos de partida

Por favor, introduzca los datos del comienzo de la línea:

Flujo másico (kg/s):

Temperatura de entrada (K):

Presión de entrada (bar, abs):

Notación de las Líneas Simples para cada configuración:

Configuración Línea Simple

Configuración Malla

Configuración División de Flujo

3. Importar datos

Pasar datos a Matlab

Figura 4.1. Interfaz de entrada: ejemplo de ventana de entrada de datos.

Se enumeran a continuación las distintas opciones de que dispone el usuario a la hora de introducir las características de su problema al programa.

4.1.1 Propiedades del gas

El usuario puede escoger entre utilizar la herramienta *Cantera* [6] como fuente de propiedades termodinámicas del fluido o usar la ecuación de los gases ideales:

- **Ecuación de los gases ideales:** las propiedades del gas son obtenidas directamente de la ecuación de los gases ideales. Si se escoge esta opción el calor específico a presión constante (C_p), el calor específico a volumen constante (C_v) y el coeficiente de dilatación adiabática del gas (γ) se suponen constantes con la temperatura.
- **Cantera:** herramienta totalmente libre y gratuita que permite la resolución de problemas termodinámicos y/o cinéticos. Para poder ejecutar el programa con *Cantera* como base de datos es necesario tener instalada una versión igual o superior a la 2.1. Supone gas ideal, pero actualiza C_p , C_v y γ con la temperatura.

4.1.2 Modos y configuraciones de resolución

Como se ha explicado anteriormente, el programa dispone de dos modos de cálculo:

- **Modo A:** el usuario introduce el valor de presión, temperatura y el gasto másico a la entrada del sistema. Se puede escoger entre tres configuraciones distintas: *Línea Simple*, *Malla* y *División de Flujo*.
- **Modo B:** el usuario fija el valor de presión y temperatura en cada uno de los extremos de la línea. En este caso únicamente se puede escoger la configuración *Línea Simple*.

En función del modo de cálculo escogido, la interfaz conduce al usuario a distintas ventanas de entrada de datos, ya que no se requiere la misma información en ambos casos.

4.1.3 Composición elemental de cada línea simple

Para cada línea simple presente en la configuración elegida, el usuario debe especificar los elementos que la componen. Para definir cada tipo de elemento hay que introducir la siguiente información:

1. **Tramo Recto:** longitud, diámetro, rugosidad y método de cálculo (adiabático o isoterma).
2. **Codo:** diámetro, ángulo de curvatura (0-180°), radio de curvatura y rugosidad.
3. **Cambio de sección:** diámetro de entrada, diámetro de salida, longitud y rugosidad.
4. **Válvula:** diámetro de entrada, C_v en unidades del S.I. o del Sistema Británico, X_t , F_p y diámetro de salida.
5. **Compresor:** como se explica en el capítulo 2, el compresor puede ser definido con un salto de presión constante o mediante sus curvas características. En función de la elección realizada varía la información requerida para definirlo.
6. **Orificios:** diámetro de entrada, número de orificios, diámetro de los orificios, anchura de los orificios, diámetro de salida y C_d en caso de disponerse.

Tras finalizar la introducción de datos, se comprueba automáticamente si falta algún parámetro importante para la resolución. En caso contrario, la interfaz permitirá transvasar la información introducida a una hoja de cálculo especial, de la que *Matlab* tomará los parámetros necesarios para la resolución del problema y posterior presentación de resultados.

4.2 Interfaz de salida

La interfaz de salida se trata únicamente de un archivo *Excel* donde la herramienta de cálculo escribe los resultados obtenidos tras la resolución. Para ello muestra los resultados de cada línea simple calculada en una hoja de cálculo distinta. Los resultados de cada línea simple se presentan en forma de matriz, tal y como se muestra a continuación:

Tipo de elemento	Bloqueo	m (kg/s)	P_in (Pa)	T_in (K)	Ma_in	P_out (Pa)	T_out (K)	Ma_out	T0_in (K)	T0_out (K)	delta_T0 (K)	P0_in (Pa)	P0_out (Pa)	delta_P0 (Pa)
Tramo Recto	0	16,91491293	959234,108	628,531819	0,08674966	958951,356	628,531263	0,0867752	629,477823	629,477823	0	964296,726	964015,468	281,257999
Cambio de sección	0	16,91491293	958951,356	628,531263	0,0867752	952649,324	627,495483	0,12567923	629,477823	629,477775	4,7803E-05	964015,468	963224,129	791,338905
Tramo Recto	0	16,91491293	952649,324	627,495483	0,12567923	952164,216	627,493475	0,12574306	629,477775	629,477775	0	963224,129	962744,417	479,712011
Codo	0	16,91491293	952164,216	627,493475	0,12574306	949887,374	627,484012	0,12604351	629,477775	629,477775	0	962744,417	960492,977	2251,44044
Tramo Recto	0	16,91491293	949887,374	627,484012	0,12604351	948231,966	627,477088	0,12626286	629,477775	629,477775	0	960492,977	958856,113	1636,86406
Codo	0	16,91491293	948231,966	627,477088	0,12626286	945945,743	627,467467	0,12656705	629,477775	629,477775	0	958856,113	956595,608	2260,50438
Tramo Recto	0	16,91491293	945945,743	627,467467	0,12656705	945799,166	627,466848	0,1265866	629,477775	629,477775	0	956595,608	956450,685	144,923614
Codo	0	16,91491293	945799,166	627,466848	0,1265866	943507,1	627,457129	0,12689313	629,477775	629,477775	0	956450,685	954184,537	2266,14807
Tramo Recto	0	16,91491293	943507,1	627,457129	0,12689313	942894,567	627,454519	0,1269753	629,477775	629,477775	0	954184,537	953578,95	605,586212
Codo	0	16,91491293	942894,567	627,454519	0,1269753	940595,486	627,44468	0,12728467	629,477775	629,477775	0	953578,95	951306,028	2272,92267
Tramo Recto	0	16,91491293	940595,486	627,44468	0,12728467	938873,816	627,437265	0,12751732	629,477775	629,477775	0	951306,028	949604,031	1701,99663
Válvula	1	16,91491293	938873,816	627,437265	0,12751732	288035,066	609,049708	0,40951732	629,477775	629,477775	0	949604,031	323289,932	626314,099
Tramo Recto	0	16,91474133	288035,066	609,049708	0,40951316	282691,203	608,320828	0,41700466	629,477361	629,477361	0	323289,187	318623,861	4665,32622
Codo	0	16,91474133	282691,203	608,320828	0,41700466	275259,041	607,242002	0,42788412	629,477361	629,477361	0	318623,861	312180,436	6443,42437
Tramo Recto	0	16,91474133	275259,041	607,242002	0,42788412	274212,312	607,08361	0,42946143	629,477361	629,477361	0	312180,436	311277,389	903,047878
Codo	0	16,91474133	274212,312	607,08361	0,42946143	266566,074	605,874769	0,44134013	629,477361	629,477361	0	311277,389	304715,99	6561,39887
Tramo Recto	0	16,91474133	266566,074	605,874769	0,44134013	257566,431	604,325665	0,45617672	629,477361	629,477361	0	304715,99	297078,367	7637,62265
Orificios	1	16,91474133	257566,431	604,325665	0,45617672	52907,0294	524,663835	1	629,477361	629,596601	-0,11924086	297078,367	100149,259	196929,108

Figura 4.2. Ejemplo de tabla de salida de datos

5. Validación de resultados

Se ha validado el programa *CHIEF* mediante la comparación de sus resultados con los obtenidos mediante el programa comercial *AFT Arrow*. En el presente capítulo se describen brevemente los resultados de este ejercicio de validación, así como algunas observaciones sobre el comportamiento de ambos programas. Pueden distinguirse dos tipos de validación:

- Respecto a los elementos: cada uno de los elementos implementados en el programa ha sido validado de forma individual para diversos casos de estudio. Por ejemplo, el elemento *Tramo Recto* ha sido validado tanto para su modo de cálculo adiabático como para el isoterma, así como para distintas características geométricas y gastos máxicos dentro de cada modo de cálculo.
- Respecto a las configuraciones: las configuraciones *Línea Simple*, *Malla* y *División de Flujo* también han sido validadas como un conjunto, para comprobar si se obtienen resultados similares en ambos programas.

A continuación se explican más en detalle las validaciones llevadas a cabo tanto para los elementos como para las configuraciones implementadas.

5.1 Validación de elementos

Como se ha dicho anteriormente, cada uno de los elementos disponibles en el programa se ha validado de forma individual. Por su extensión, se muestran aquí únicamente los resultados más reseñables de cada una de estas validaciones, que pueden ser consultadas de una forma más completa en el Anexo G.

- **Tramo Recto**: los resultados obtenidos con *CHIEF* y con *AFT Arrow* son prácticamente idénticos, como se puede observar en la Figura 5.1:

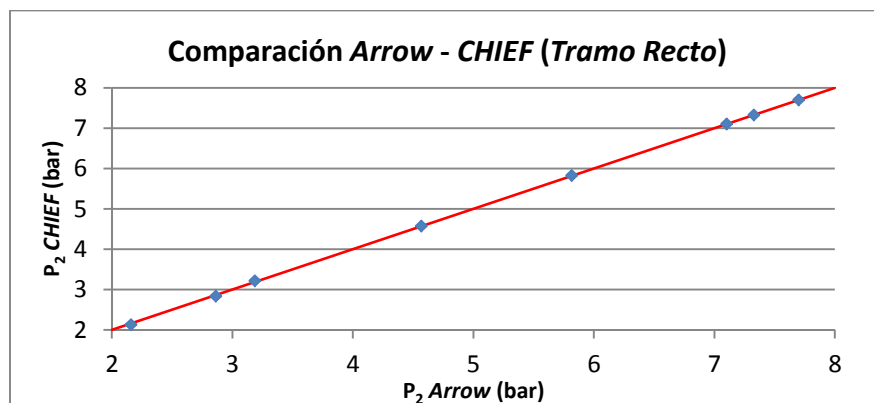


Figura 5.1. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento *Tramo Recto*

En la figura anterior se muestran los resultados de presión de salida del elemento (P_2) obtenidos por ambos programas para todos los casos estudiados del modo de cálculo adiabático. Se observa que los puntos se sitúan exactamente sobre la bisectriz (línea

roja), indicando que la P_2 calculada por ambos programas es prácticamente la misma. Los resultados del modo de cálculo isoterma muestran un grado de coincidencia similar.

- **Codo:** la validación muestra resultados similares para ambos programas, especialmente cuando el Ma del flujo no es muy elevado (inferior a 0.5). No obstante, conforme aumenta el Ma de entrada (y por tanto las pérdidas de presión), los resultados van divergiendo, como se observa en la Figura 5.2:

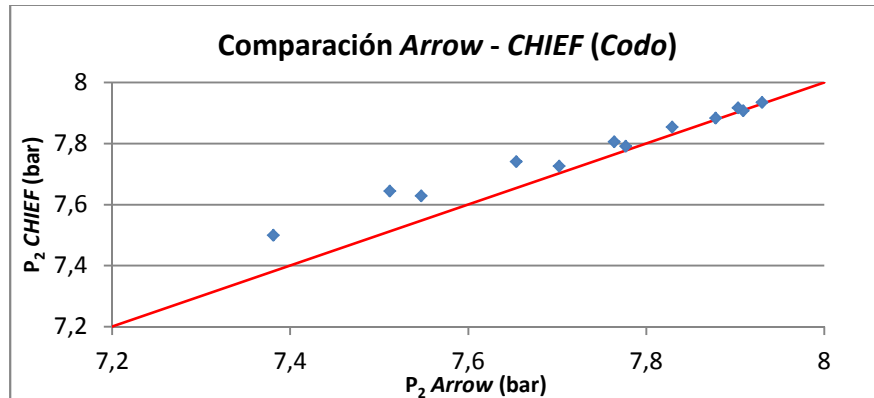


Figura 5.2. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento *Codo*

Estas diferencias se deben a la distinta fuente bibliográfica empleada por ambos programas a la hora de obtener la constante de pérdidas del codo (véase capítulo 2). No se ha encontrado ninguna indicación acerca de cuál de las dos opciones es más fiable, por lo que estas discrepancias no pueden interpretarse como un error de ninguno de los dos programas.

- **Cambio de Sección:** los resultados obtenidos por ambos programas son muy similares en la mayoría de casos estudiados, tanto para cambios de sección convergente como divergente. En la Figura 5.3 se muestra la totalidad de casos estudiados:

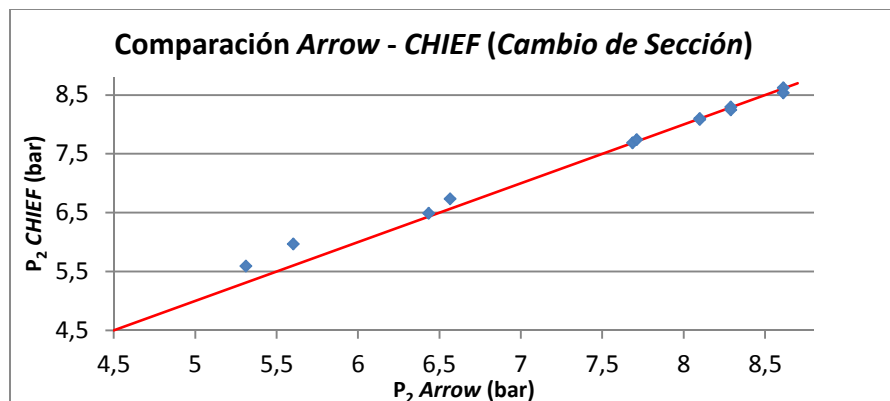


Figura 5.3. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento *Cambio de Sección*

Para el caso de un cambio de sección convergente, el gasto másico de bloqueo calculado por ambos programas es ligeramente distinto (del orden del 2.5% para el caso descrito en el Anexo G), por lo que los puntos de bloqueo sónico no han podido ser incluidos en la Figura 5.3 al tenerse distintos gastos másicos en los dos programas. Esto es debido al distinto método de cálculo empleado para este tipo de elemento, como se explica en el Anexo G.

- **Válvula:** los resultados obtenidos por ambos programas son prácticamente idénticos, como se puede observar en la Figura 5.4:

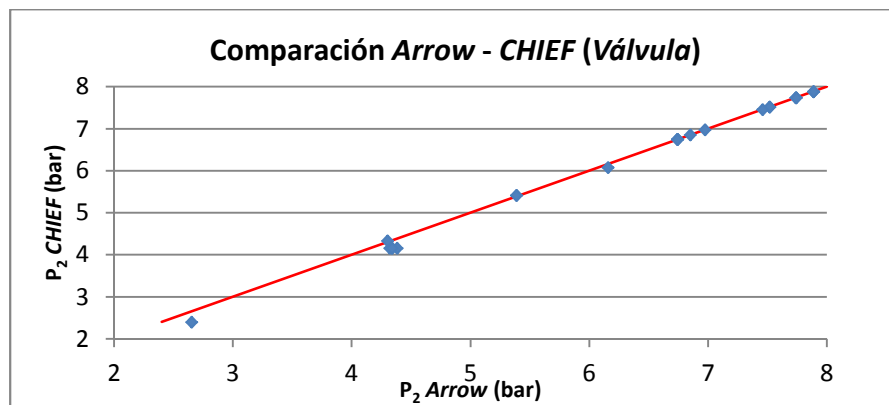


Figura 5.4. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento *Válvula*

La mayoría de los puntos se sitúan exactamente sobre la bisectriz, mostrando una perfecta correlación entre los resultados proporcionados por ambos programas. Los puntos que quedan ligeramente debajo de la bisectriz corresponden a situaciones en las cuales la válvula se encuentra bloqueada. En dichos casos, las pequeñas diferencias encontradas en el cálculo del gasto másico de bloqueo (máximo del 0.38% para los casos estudiados) causan estas diferencias en la P_2 calculada por ambos programas. En el anexo G se demuestra que el cálculo del gasto másico de bloqueo realizado por *AFT Arrow* para el caso estudiado no es del todo preciso, ya que la caída de presión producida en la válvula es inferior a la dictada por el valor del parámetro X_t introducido por el usuario.

- **Compresor:** puesto que los resultados de este elemento son calculados mediante la aplicación directa de un ratio de presión y de un rendimiento isoentrópico introducidos por el usuario (véase Anexo B), no tiene sentido realizar una comparación entre ambos programas, ya que los resultados serían idénticos.

- **Orificios:** los resultados obtenidos por ambos programas presentan una muy buena correlación, según se puede apreciar en la Figura 5.5:

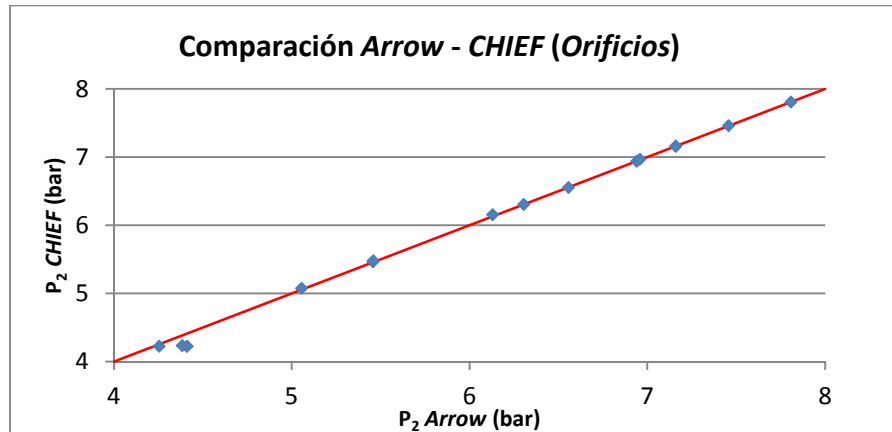


Figura 5.5. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento *Orificios*

Los puntos situados bajo la bisectriz corresponden a los casos estudiados de bloqueo, al igual que ocurría en el elemento *Válvula*. Respecto al cálculo del gasto másico de bloqueo, la diferencia máxima encontrada entre ambos programas es del 0.31%.

5.2 Validación de configuraciones

Para realizar la validación de las distintas configuraciones, se ha decidido hacer uso de un caso real de la industria: la línea IBH (*Inlet Bleed Heat*) de un turbocompresor situado en una central de ciclo combinado. La línea IBH consta de 18 elementos en serie, de acuerdo con la configuración descrita en el Anexo H, donde se puede encontrar información de cada uno de los elementos que la componen.

5.2.1 Línea Simple

Como se ha comentado anteriormente, la configuración *Línea Simple* posee dos modos de cálculo, por lo que ambos serán evaluados de forma separada:

- **Línea Simple A:** modo de cálculo en el cual el usuario fija el gasto másico.
Se ha resuelto la línea IBH con 3 gastos másicos diferentes. Para todos los casos se fija $P=10$ bar y $T=600$ K en la entrada de la línea IBH y el programa debe calcular la presión de salida. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.6:

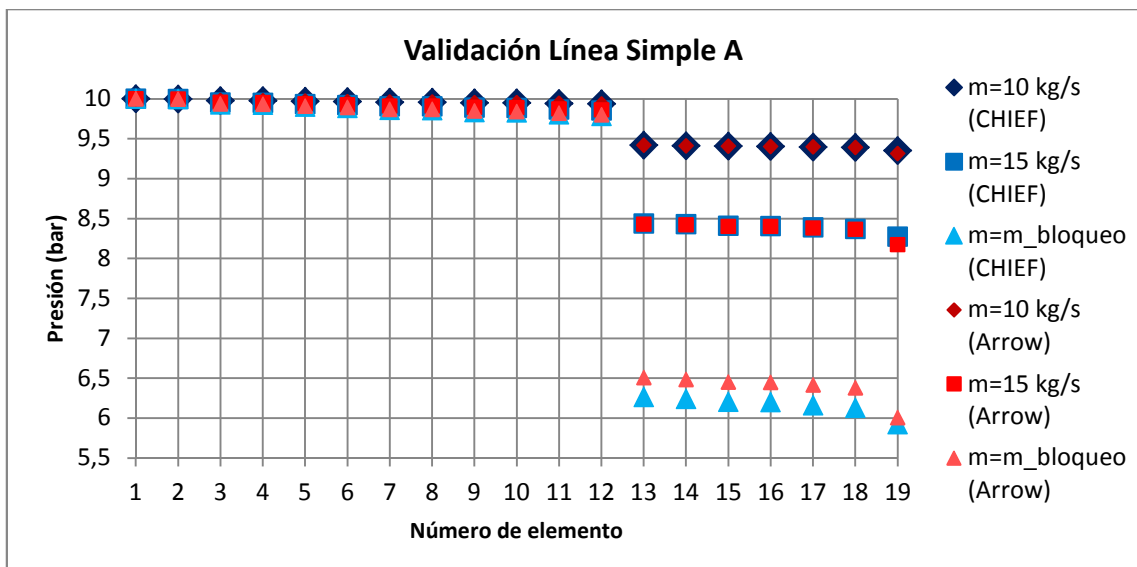


Figura 5.6. Resultados de la validación de la Línea Simple A

En la figura anterior se muestra la evolución de la presión estática a lo largo de la línea IBH según los cálculos de ambos programas. Para cada programa se ha resuelto la línea para 3 gastos másicos diferentes:

- 10 kg/s
- 15 kg/s
- El gasto másico máximo aplicable a la línea (su gasto másico de bloqueo):
 - 18.13 kg/s según CHIEF
 - 17.97 kg/s según AFT Arrow

Como se puede observar en la Figura 5.6, ambos programas presentan un comportamiento muy similar, especialmente para los dos gastos másicos inferiores al de bloqueo. No obstante, para el caso de bloqueo sónico los resultados a partir de elemento número 12 (válvula) presentan una mayor diferencia. Esto es debido a que, como se mencionó en apartado anterior, para el modo de cálculo A (gasto másico

fijado) *AFT Arrow* no llega exactamente hasta el punto de bloqueo, siendo la caída de presión producida en la válvula inferior a la que debería producirse según el parámetro X_t de la válvula introducida: en *CHIEF* el valor de pérdida de presión relativa es exactamente 0.36 (valor de X_t de la válvula, como se puede comprobar en el Anexo H), mientras que los resultados obtenidos con *AFT Arrow* indican que la pérdida de presión relativa en el caso de bloqueo es de 0.336, valor inferior a X_t . Esto provoca que en la salida de la válvula la presión sea ligeramente superior para el caso del *AFT Arrow* que para *CHIEF*.

- **Línea Simple B:** modo de cálculo en el cual el usuario fija la presión de salida de la línea. Se ha resuelto la línea IBH con 3 valores distintos de presión en su desembocadura. Para todos los casos se tiene al comienzo de la línea IBH una presión de 10 bares y una temperatura de 600 K, deseándose calcular el gasto másico circulante y la presión en cada elemento. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.7:

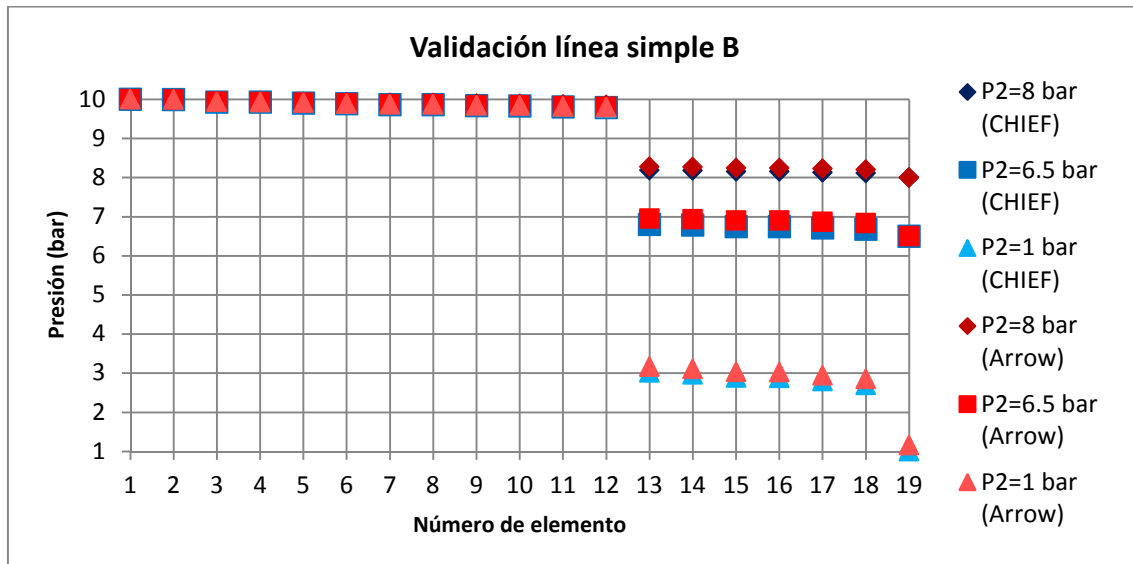


Figura 5.7. Resultados de la validación de la Línea Simple B

En la figura anterior se puede observar cómo para los tres casos estudiados la evolución de la presión estática calculada a lo largo de la línea por ambos programas es muy similar. Los valores de gasto másico calculados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Resultados de gasto másico calculados por ambos programas

Valor fijado de P_2	Gasto másico <i>CHIEF</i>	Gasto másico <i>Arrow</i>	Diferencia (%)
$P_2 = 8 \text{ bar}$	15.76 kg/s	15.47 kg/s	1.87
$P_2 = 6.5 \text{ bar}$	17.97 kg/s	17.77 kg/s	1.12
$P_2 = 1 \text{ bar}$	18.13 kg/s	17.98 kg/s	0.83

Nótese que el gasto másico calculado para el caso de fijar $P_2 = 1 \text{ bar}$ es exactamente igual al gasto másico de bloqueo obtenido en el apartado anterior (método de cálculo

A). Esto indica que la línea simple se encuentra bloqueada, y que ambos métodos de cálculo presentan resultados coherentes. Efectivamente, tanto *CHIEF* como *AFT Arrow* avisan de que tanto el elemento número 12 (válvula) como el 18 (orificios) se encuentran bloqueados.

Si se recuerda la Figura 5.6, el primer elemento de la línea que entra en bloqueo es la válvula, fijando el gasto másico máximo de toda la instalación. Una vez la línea se encuentra bloqueada con dicho gasto másico se obtiene una presión de salida de aproximadamente 6 bares. Si dicha presión de salida se reduce a 1 bar, y puesto que la línea no puede aumentar su gasto másico por encima de su valor de bloqueo, comienzan a producirse ondas de choque a la salida de los elementos bloqueados, de forma que el flujo se acomode a la P_2 impuesta. Observando la Figura 5.7 se concluye que las pérdidas de presión irreversibles debidas a las ondas de choque calculadas por ambos programas son prácticamente iguales.

5.2.2 Malla

Para validar la configuración *Malla* se ha calculado el lazo de recirculación que forman el compresor de una central de ciclo combinado conjuntamente con su línea IBH, como se puede observar en la siguiente figura:

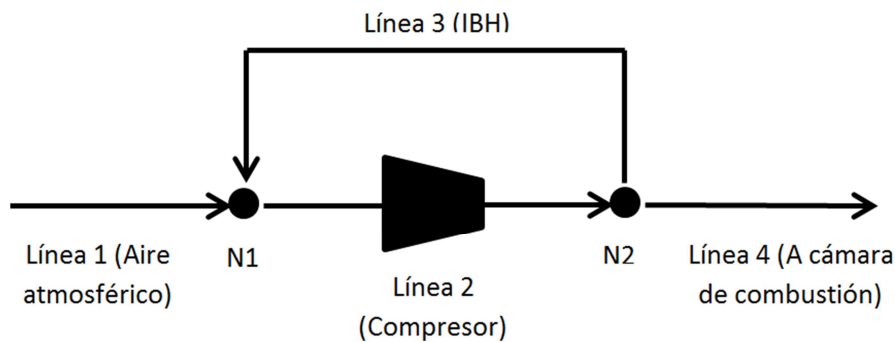


Figura 5.8. Esquema de la instalación utilizada en la validación de la configuración *Malla*

Al igual que en el apartado anterior, los detalles de la instalación pueden ser consultados en el Anexo H. Se ha fijado un gasto másico de entrada a la línea 1 de 400 kg/s, con una temperatura de 300 K y una presión de 1 bar. Para estas condiciones, se ha resuelto la configuración *Malla* en ambos programas, obteniendo:

Tabla 5.2. Resultados de la validación de *Malla*

	<i>CHIEF</i>	<i>AFT Arrow</i>	Diferencia (%)
\dot{m}_{L2} (kg/s)	416.91	416.95	0.01
\dot{m}_{L3} (kg/s)	16.91	16.95	0.23
P_{N1}^0 (bar)	1.00	1.00	0.00
T_{N1}^0 (K)	312.4	313.4	0.32
P_{N2}^0 (bar)	9.643	9.638	0.05
T_{N2}^0 (K)	629.5	620.9	1.38

En la tabla 5.2 se muestran los parámetros que se han considerado más interesantes para un rápido análisis de los resultados de la validación. Como se puede observar, las diferencias entre ambos programas son mínimas, siendo la mayor de ellas la temperatura de remanso del nodo 2. Esto es debido a que *AFT Arrow*, a diferencia de *CHIEF*, no desprecia los efectos de la temperatura en el calor específico del gas, causando la diferencia observada en las temperaturas de salida del compresor. Esto se considera como una futura mejora a llevar a cabo en el programa.

En ambos programas se avisa de que la línea 3 (línea IBH) se encuentra bloqueada, con caídas de presión irreversibles debidas a ondas de choque en dos de sus elementos (válvula y orificios). Si se aísla esta línea, se puede observar que presenta un comportamiento muy similar al estudiado en el apartado anterior para el caso de *Línea Simple B*, con P_2 fijada a 1 bar.

Hay que resaltar que el caso validado en este apartado es el de *Malla (Recirculación)*, ya que el sentido del flujo es distinto para los dos ramales en paralelo. Puesto que el caso *Malla (Bifurcación)* se ha validado para una instalación distinta a la utilizada en este capítulo, por motivos de brevedad se ha preferido no incluirla aquí, remitiéndose al Anexo I, donde se demuestra que los resultados de la validación resultan satisfactorios también para dicho caso.

5.2.3 División de Flujo

Para la validación de la configuración *División de Flujo*, se ha supuesto que la línea IBH, en lugar de recircular a la entrada del compresor, descargase en un depósito que posee unas condiciones de presión y temperatura P_{Dep}^0 , T_{Dep}^0 . La configuración a resolver sería la siguiente:

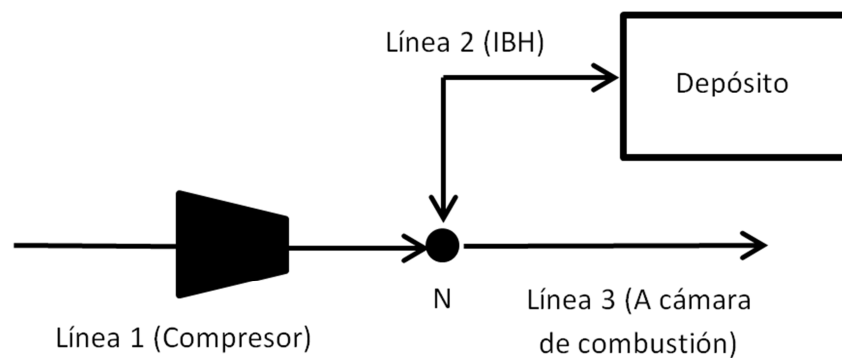


Figura 5.9. Esquema de la instalación utilizada en la validación de la configuración *División de Flujo*

Los detalles de la instalación pueden ser consultados en el Anexo H. Al igual que en el apartado anterior, el gas entra a la línea 1 con una presión de 1 bar, una temperatura de 300 K y un gasto másico de 400 kg/s.

Dependiendo del valor fijado de P_{Dep}^0 , el flujo de gas de la línea 2 puede estar entrando o saliendo del depósito. Sabiendo que la presión de salida del compresor es de aproximadamente 10 bar, se evalúan los siguientes dos casos:

- **Caso 1:** $P_{Dep}^0 = 5 \text{ bar}$, $T_{Dep}^0 = 600 \text{ K}$. Previsiblemente el flujo entrará al depósito.
- **Caso 2:** $P_{Dep}^0 = 15 \text{ bar}$, $T_{Dep}^0 = 600 \text{ K}$. En principio, el flujo abandonará el depósito.

Los resultados de ambos casos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5.3. Resultados de la validación de *División de Flujo*: Caso 1.

	CHIEF	AFT Arrow	Diferencia (%)
P_N^0 (bar)	9.687	9.642	0.47
T_N^0 (K)	605.26	595.60	1.62
\dot{m}_{L1} (kg/s)	400.00	399.91	0.02
\dot{m}_{L2} (kg/s)	17.41	17.32	0.52
\dot{m}_{L3} (kg/s)	382.59	382.59	0.00

Como se observa en la tabla anterior, las diferencias obtenidos en el Caso 1 son muy pequeñas, y únicamente se considera significativa la relativa a la temperatura de remanso del nodo (por los mismos motivos explicados para el caso *Malla*). Tal y como se esperaba, el flujo de la línea 2 se dirige desde el nodo hacia el depósito, reduciendo el gasto másico que se dirige a la cámara de combustión por la línea 3. En la línea 2 se detectan condiciones de bloqueo en el elemento número 12 (válvula) en ambos programas.

Tabla 5.4. . Resultados de la validación de *División de Flujo*: Caso 2.

	CHIEF	AFT Arrow	Diferencia (%)
P_N^0 (bar)	9.687	9.642	0.47
T_N^0 (K)	604.65	595.60	1.52
\dot{m}_{L1} (kg/s)	400.00	399.90	0.02
\dot{m}_{L2} (kg/s)	26.75	26.35	1.51
\dot{m}_{L3} (kg/s)	426.75	426.75	0.00

Para el Caso 2 se muestran diferencias similares a las obtenidas en el Caso 1, siendo de nuevo las dos más relevantes las relativas a la temperatura en el nodo y al gasto másico de la línea 2. Tal y como se esperaba, el flujo de la línea 2 se dirige desde el depósito al nodo, aumentando el gasto másico de entrada a la cámara de combustión (línea 3). En este caso la línea 2 no se encuentra bloqueada.

6. Conclusiones

Para la elaboración del Proyecto desarrollado se ha partido del estudio y comprensión de la teoría de flujo compresible en conductos. Tras esta primera fase, se ha realizado un análisis de los programas comerciales existentes de cálculo de redes de flujo compresible, de forma que se pudieran evaluar sus características, puntos fuertes y débiles. Como resultado, se obtuvo un conocimiento lo suficientemente amplio como para poder definir los objetivos y el alcance del programa de cálculo que debía desarrollarse. En primer lugar, se definieron las ecuaciones y parámetros que permiten describir el comportamiento hidráulico de cada uno de los seis elementos considerados (*Tramo Recto, Codo, Cambio de Sección, Válvula, Compresor y Orificios*). Partiendo de estos submodelos, se han desarrollado los distintos procedimientos de cálculo necesarios para resolver cada una de las configuraciones propuestas al inicio del trabajo (*Línea Simple, Malla y División de Flujo*), completando la creación del programa con el desarrollo de sus interfaces de entrada y salida. Como último paso, y tras conseguir acceso a una licencia del programa comercial *AFT Arrow*, se ha realizado la validación del programa, resultando ésta satisfactoria.

Tras completar todas estas etapas, se dispone de un programa validado de cálculo de flujo compresible en conductos y accesorios capaz de resolver configuraciones relativamente simples, pero de uso común en la industria. Además, es capaz de calcular de forma robusta situaciones de bloqueo sónico en cualquiera de sus posibles casos, incluyendo las pérdidas de presión debidas a ondas de choque (a diferencia de muchos programas comerciales, como *Pipe Flo*). Se consideran pues cumplidos los objetivos propuestos al comienzo del Proyecto.

De cara a una posible ampliación o mejora del programa, se consideran las siguientes posibilidades:

- Implementación de ecuaciones de gas real.
- Considerar el efecto de la temperatura en el calor específico del gas en los balances de energía en nodos y en el compresor.
- Modificación de algunos métodos de cálculo para intentar reducir el tiempo de cálculo requerido.
- Posible ampliación de las configuraciones que pueden analizarse.
- Mejora en el diseño de interfaces, tanto de entrada como de salida.

Índice de Figuras

Figura 3.1. Esquema de la configuración <i>Malla</i>	11
Figura 3.2. Esquema de la configuración <i>División de Flujo</i>	11
Figura 3.3. Cálculo del gasto másico límite entre <i>Bifurcación y Recirculación</i>	15
Figura 3.4. Ilustración gráfica de las dos posibles soluciones que pueden encontrarse en el caso <i>Recirculación</i>	18
Figura 4.1. Interfaz de entrada: ejemplo de ventana de entrada de datos.	24
Figura 4.2. Ejemplo de tabla de salida de datos.....	25
Figura 5.1. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento <i>Tramo Recto</i> ..	27
Figura 5.2. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento <i>Codo</i>	28
Figura 5.3. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento <i>Cambio de Sección</i>	28
Figura 5.4. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento <i>Válvula</i>	29
Figura 5.5. Comparación de resultados de ambos programas para el elemento <i>Orificios</i>	30
Figura 5.6. Resultados de la validación de la Línea Simple A.....	31
Figura 5.7. Resultados de la validación de la Línea Simple B	32
Figura 5.8. Esquema de la instalación utilizada en la validación de la configuración <i>Malla</i>	33
Figura 5.9. Esquema de la instalación utilizada en la validación de la configuración <i>División de Flujo</i>	34

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Comparación de programas comerciales de cálculo de flujo compresible en conductos	2
Tabla 5.1. Resultados de gasto másico calculados por ambos programas	32
Tabla 5.2. Resultados de la validación de <i>Malla</i>	33
Tabla 5.3. Resultados de la validación de <i>División de Flujo</i> : Caso 1.....	35
Tabla 5.4. Resultados de la validación de <i>División de Flujo</i> : Caso 2.....	35

Bibliografía

- [1] White F.M.; *Fluid Mechanics*; McGraw-Hill; 1994.
- [2] Idel'chik, I. E.; *Memento des pertes de charge*; Eyrolles; 1986.
- [3] Masoneilan; *Control Valve Sizing Handbook*; 2000.
- [4] Mallamo F.; *Appunti del corso di Macchine*; Politecnico di Torino; [27/05/2015]; http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/08BNIDN/Cap4_moto_in_condotti.pdf
- [5] AFT Arrow; [22/05/2015]; <http://www.aft.com/documents/AFT-Modeling-Choked-Flow-Through-Orifice.pdf>
- [6] Cantera; [22/05/2015]; <https://code.google.com/p/cantera/>

